氣候變遷對農作物生產之影響
第2章　全球氣候變遷對全球與臺灣地區氣象環境
之影響及因應策略 7-32, 1998

第二章　全球氣候變遷對全球與臺灣地區氣象環境之影響及因應策略

廖　志　翔
交通部中央氣象局農業氣象科

摘要 …… 8
壹、前言 …… 8
貳、溫室效應氣體變化與趨勢 …… 9
參、全球變遷對全球與臺灣氣象環境影響 …… 13
肆、因應策略 …… 24
伍、結語 …… 27
陸、引用文獻 …… 28
英文摘要 …… 32

第二章　全球氣候變遷對全球與台灣地區氣象環境之影響及因應策略

廖　志　翔
交通部中央氣象局農業氣象科

摘　　要

由於人類活動，增加了大氣中溫室氣體的濃度，加強溫室效應，導致氣候的改變，暖化了地球表面。在此氣候變遷趨勢下，對全球與臺灣地區氣象環境之衝擊與如何因應，是國際間及我國必需面臨的問題。本文主要的目的在回顧近年來有關這方面的研究與報告，並對因應之道提出一些建議。首先討論大氣中溫室效應氣體濃度變化及未來預估的可能排放量，其次探討全球與台灣歷年來氣候變化情況。過去一世紀以來，全球平均氣溫已上升約0.6℃，海水位上升約10～20公分，未來在二氧化碳濃度倍增下，估計全球氣溫與海平面將持續上升。氣候變異性所致的災害性天氣頻率將增加也將趨於更嚴重性，如此氣候環境的明顯改變，不但影響農作物的生產，也將對水資源管理與糧食穩定性造成衝擊。最後提出對溫室氣體排放減量，尤其是能源、森林及農業的控制措施，以及氣候研究與預測，水資源的永續發展與海岸變遷等因應策略。

關鍵詞：溫室效應氣體，氣候變遷，氣候變異性，永續發展。

壹、前　　言

人類歷史是一部不斷與自然環境爭奪資源的對抗史，人類與自然環境的相互影響變動，由早期的原始時代，轉入農業時代，再進入工業時代，即將邁入廿一世紀永續發展時代。隨著經濟發展與人口成長，由於能源消耗(化石燃料燃燒)，工業過程(氟氯碳化物生產與使用、廢棄物的填土、水泥製造)，土地使用的改變(採伐森林、生質燃燒)以及農業耕作(稻米生產、肥料使用、畜產)等各式的人類活動，改變了大氣中溫室氣體的濃度，進而影響地球的氣候。大氣中的二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亞氮(N_2O)、氟氯碳化物(CFCs)等主要溫室氣體，吸收由地表放出的紅外線輻射，產生溫室效應而暖化了地球。科學界均認為溫室氣體增加，應會加強大氣的溫室效應，導致氣候的改變，使得地表氣溫上升(Bolin *et al.*, 1986; Ramanathan, 1988)。人為排放之溫室氣體加強溫室效應，這些氣體因人類活動而逐漸增加，已被視為對氣候有極大的威脅。

大氣中溫室氣體的持續上升將會對地球物理、水文及生物環境的循環造成一定的干擾。這些干擾所造成的改變，尤其是在氣候上的改變，對地面上的有機或無機活動的影響，絕不僅限於局部(local)或區域(regional)的問題，而是全球性的問題，更甚之，對生命的永續性亦可能造成巨大

的衝擊和傷害(梁等，1997)。21世紀預期全球人口將持續增加，能源消耗亦將同步增加，全球氣溫將因大氣中溫室氣體濃度的持續增加而上升，因此科學界普遍預期全球氣候暖化將持續，氣候變異增大。依據聯合國政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 1996年的評估報告指出，人類活動所排放的溫室氣體若不採取任何防制措施，預估於2100年時全球平均地面氣溫將比1990年上升1.0～3.5℃，海平面也將上升15～95公分。其後果將是氣候系統發生變遷，導致暴雨或乾旱的極端事件頻傳；區域降水型態發生變化，造成水資源分配不均或不足；生態環境遭受到破壞，改變區域動植物生長分佈與生態平衡，對全球糧食的穩定性與農業的永續性，造成相當干擾與限制。同時海水位上升，不但使海島國消失，且易導致低窪地區海水倒灌，積水不退；海流改變，漁場轉移(謝，1997)。

由於人類活動所引起的氣候變遷(climate change)，近年來成為大氣與地球科學界研究的重要題目，也獲得一些重要的結果。但是，整個全球氣候變遷的推估，仍存在著許多不確定性與問題，有待科學家更深入的研究與探討，以減少不確定性。為了明確估算未來全球氣候變遷的變化尺度，以了解氣候改變的影響程度及對環境的衝擊有多大，以便謀求解決與適應之道，就需有密集的觀測網，作有系統的長期觀測；偶合大氣圈-地圈-生物圈-海洋圈等全球模式，發展高解析度預測模式；以及確定未來人文社會變動、生態系結構改變、環境控制與重整、工商活動等複雜的社會與經濟因素，才可能較清楚的描述氣候變遷的變化尺度。

本章節僅就全球氣候變遷對全球與臺灣地區氣象環境之影響有關這方面的報告與研究做一回顧。因溫室效應氣體增加，會干擾與破壞氣候系統，因此本文首先探討溫室氣體的變化及未來趨勢，然後從氣候的改變、災害性天氣、海平面上升等氣象環境的衝擊方面作一描述，並對有關這方面的因應策略提出一些建議。

貳、溫室效應氣體變化與趨勢

一、溫室氣體排放

如果地球表面沒有大氣層存在，則地表上的熱平衡就完全仰賴輻射的作用，太陽短波輻射加熱地面，而地球表面卻因輻射長波紅外線而冷卻。當兩種輻射達平衡時，估計地球表面的平均溫度大約是-18℃。但是由於地球表面有大氣層存在，大氣層裏含有吸收紅外線輻射的氣體，這些氣體吸收紅外線輻射後，有部分的輻射會再返回地球，使地球表面增溫，地球表面猶如覆蓋在一層玻璃罩下，形成所謂的溫室效應(greenhouse effect)。由於溫室效應的存在，使地球表面的平衡溫度為15℃，遠高於-18℃。而會吸收紅外線的氣體稱為溫室氣體(greenhouse gases)。大氣中主要的溫室氣體有水汽(H_2O)、二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亞氮(N_2O)、臭氧(O_3)及氟氯碳化物(CFCs)等氣體。就是這些溫室氣體，長期以來使地球表面溫度能保持在此適合生物生存的溫度。

上述的溫室氣體中，水汽在本節中並不討論，主要是水汽含量和天氣系統有密切的關係，它隨時間、空間變化很大，受人為影響很小，且平均壽命很短，故以全球尺度及較長尺度的平均而言，其濃度變化不大。大氣中CO_2、CH_4、N_2O及CFCs等溫室效應氣體，只有氟氯碳化物為人為製成，其他的溫室氣體有天然存在及人為排放，它們在大氣、海洋及生物圈之間不斷的進行交換，且在大氣中之生命期很長，所以能在對流層內均勻混合。IPCC (1990)曾比較CO_2、CH_4、N_2O、CFC-11與CFC-12等氣體，在1990年的大氣濃度下，受到微小變動之單位分子的輻射作用量(radiative forcing)，並以CO_2為準，得彼此之間的比值為1：21：206：12400：15800。雖然

這些溫室氣體的溫室效應比二氧化碳強，但其濃度比二氧化碳低。因大氣中二氧化碳含量較高，因此對全球暖化的影響以CO_2最大，約佔55% 左右，而其他約一半的貢獻則來自於這些氣體。全世界每年CO_2的排放約64億萬噸，美國佔19.37%，歐洲18.54%，獨立國協(早期蘇聯)佔12.90%，中國大陸佔7.68%，臺灣佔0.44%。CH_4每年排放3.5億萬噸，中國大陸佔14.87%，歐洲佔10.79%，美國佔9.29%，臺灣佔0.18%。N_2O每年排放378萬噸，美國佔19.98%，歐洲10.07%，中國大陸佔6.03%，臺灣佔0.21%。CFCs每年的排放約65億萬噸，歐洲佔36.86%，美國佔24.67%，獨立國協佔10.76%，臺灣佔0.14% (Subak *et al.*, 1993)。謝(1997)利用IPCC準則估算1990年臺灣的溫室氣體排放總量為149百萬噸二氧化碳當量，其中二氧化碳排放量佔83%、甲烷佔15%、氧化亞氮佔2%。而在溫室氣體排放源以「能源使用」為最大，佔78%，農業僅佔約6%。

㈠二氧化碳(CO_2)

二氧化碳是大氣中含量最多及最主要的溫室氣體。在各種溫室氣體中，二氧化碳造成的問題最嚴重，且是目前科技水準最難解決的一種(柳中明等，1997)。它在大氣中的生命期長，約50至200年(IPCC，1990)，其生成主要來自化石燃料(fossil fuel)的利用及燃燒。由於化石燃料燃燒，土地使用改變(例如開伐森林等)，海洋與陸地生物圈吸收間之差距，而使大氣中二氧化碳濃度逐漸增加。自工業革命以來，由於人類大量利用及燃燒化石燃料，導致大氣中二氧化碳濃度大幅增高，工業革命前(西元1750年～1800年)大氣中的二氧化碳濃度大約為280ppmv，十九世紀後則呈直線的增加，目前約353ppmv，每年以1.8ppmv之速率增加(IPCC，1990；1992)。由極區冰柱中空氣樣品及大氣的量測，自工業革命以來，二氧化碳濃度增加約25% (圖1)。

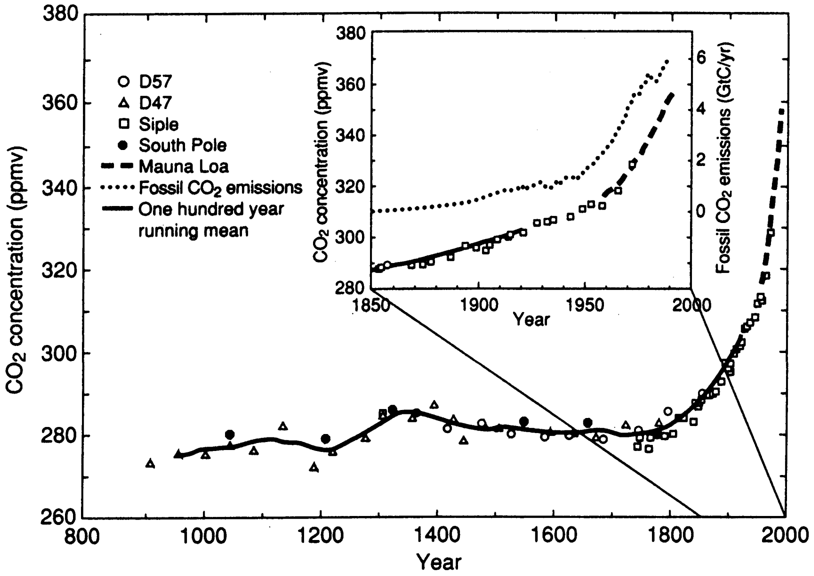


圖1. 近千年來二氧化碳濃度變化，資料來自冰柱(D47, D57, Siple及南極)與Mauna Loa的量測(1958年起)。直線為百年移動平均，圖中插圖是1850年至今，CO_2濃度變化與化石燃料排放CO_2的比較(IPCC, 1992)

季節性變化隨緯度之不同有相當大的差異，在北半球高緯度最大，向低緯度而遞減。觀測顯示，自從1958年以來增加約20%，每年之增加率約為1.5ppmv。近十年來臺灣地區二氧化碳的總排放量由1987年的91百萬公噸，逐年上升到1996年的171百萬公噸，每人平均排放量由4.6公噸增加至目前的8公噸。(謝，1997)。

㈡甲烷(CH_4)

甲烷是僅次於二氧化碳的重要溫室效應氣體，1990年甲烷在大氣中濃度為1.72 ppmv，而工業革命前之濃度僅有0.8ppmv，年增率為0.015ppmv。圖2為極區冰柱中空氣樣品及大氣量測所得之濃度變化，在最近200年來，甲烷濃度增加約1倍以上。而根據分析報告，近十年來大氣中甲烷濃度之增加已趨緩(WMO，1992)。1970年代每年增加20ppbv或1.3%，而1980年中期每年增加12-13ppbv或0.75%，1989年年增加減為10 ppbv或0.6%，1992年年增加降為僅5ppbv或0.3%。其減少原因可能係由於自然或人為排放降低所致。甲烷濃度在南半球中高緯度變化不大，濃度則向北增加，北半球高於南半球，在北半球高緯度地區濃度最高。甲烷自然界的主要來源有自然溼地、野生反芻動物(ruminants)、白蟻(termites)及海洋與淡水湖泊。而人類活動所致如化石燃料生產(煤礦、天然氣開採)，水稻田耕作、生質燃燒、家畜養殖、有機物發酵作用及填土(landfills)是大氣中甲烷的主要來源。甲烷主要匯(

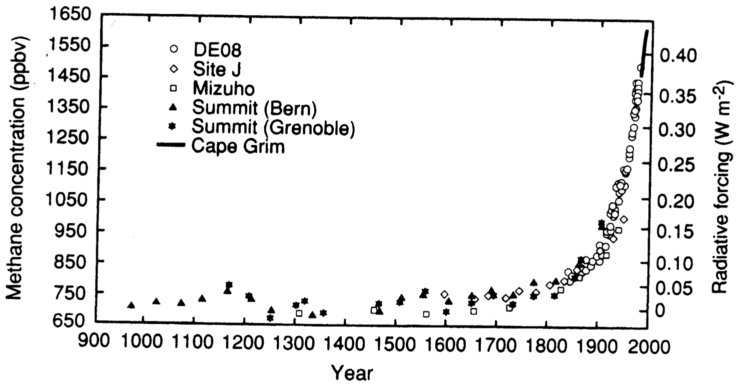


圖2. 近千年來大氣中甲烷濃度變化(IPCC, 1992；楊盛行, 1995)

sink)是在大氣中與OH基反應。臺灣地區1990年由產煤所逸出之甲烷為38.71千公噸，油氣所排放的為33.97千公噸，生質燃燒所排放之甲烷為6.95千公噸，共計 79.63千公噸(楊等，1994)，農業生產排放之甲烷為 6.96千公噸(謝，1997)。

㈢氧化亞氮(N_2O)

氧化亞氮目前存在大氣中是很微量的，但是為一長存的溫室氣體，生命期約150年，目前濃度約為310ppbv，比工業化前的288ppbv增加8%，每年以0.8ppbv或0.2-0.3%增加。根據極區冰柱中空氣樣品分析及大氣量測結果(圖3)知，1600～1800年之工業化前氧化亞氮濃度一直維持在285pp bv左右，然後在1940年以後其濃度開始快速增加。氧化亞氮的時空變化均小，在北半球的濃度高於南半球，但兩半球間差距僅約1 ppbv。由於缺乏N_2O通量(fluxes)量測以及生物地球化學交換作用與土地狀況的複雜性，大氣中氧化亞氮的源與匯是很難精確的

定量它。N_2O的自然源主要來自天然土地過程與海洋，而主要人為來源為化石燃料燃燒、生質燃燒及施肥。然而N_2O在平流層中因與氧原子之化學作用而分解。臺灣地區生質燃燒所排放之氧化亞氮共計約0.09千公噸(楊等，1994)，農業生產排放之氧化亞氮約1.85千公噸(謝，1997)。

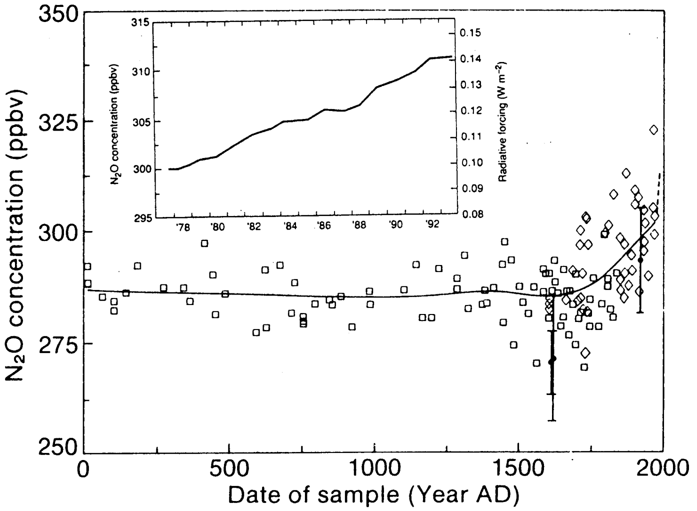


圖3. 近千年來大氣中氧化亞氮濃度變化(IPCC,1992；楊盛行,1995)

(四)氟氯碳化物(CFCs)

氟氯碳化物完全是工業時代的產物，能破壞平流層的臭氧，是氟、氯和碳的化合物，主要為CCl_3F (CFC-11)、CCl_2F_2(CFC-12)、$C_2Cl_3F_3$ (CFC-113)與CCl_4，其在大氣中的濃度分別為280pptv，484pptv，60pptv和146pptv，在北半球濃度高於南半球，它們生命期很長均高達50年以上。近十幾年來，CFC-11和CFC-12成長速率驚人，在大氣中濃度增加近100%。CFC-13增加約30%，CCl4增加20% (IPCC，1990)。CFCs主要使用當作煙霧質推進燃料(CFC11, 12, 114)，冷煤(CFC12, 114)，發泡包裝劑(CFC11, 12)和溶劑(CFC113, CCl4)。CFCs在平流層中會因化學反應而解體。CFC s和HCFCs(氫氟氯碳化合物)因受蒙特婁公約的管制，目前之濃度年增率已有下降的趨勢。取而代之的是氫氟碳化合物(HFCs)、全氟碳化合物(PFCs)與六氟化硫(SF6)。

(五)臭氧(O_3)

由於大氣中的臭氧層能吸收太陽輻射中的紫外線，因此臭氧的減少，會使得到達地面的紫外線輻射強度增強。依據WMO (1994)及Bojkov (1995)的分析，全球總臭氧量在過去15年以來減少5%。平均而言，北半球約減少6.5%，南半球約9.5%，主要在低平流層(30公里附近)減少，且以南極上空減少最多。同樣地，在北半球高緯度亦出現總臭氧量減少的情形，赤道地區則減少較少。Bojkou *et al.* (1993)指出，1992-1993年冬天，北半球高緯度出現紀錄以來的最低總臭氧量，約較過去減少15%，此現象在1993-1994年冬天減緩。但是，1994-1995年冬天又恢復減少，其範圍較1992-1993年冬天為廣，有些地區總臭氧減少達25%。在這之前，1994年10月南極上空出現紀錄以來的最低總臭氧量(Kerr, 1994)。以上顯示，全球平流層臭氧減少的趨勢仍在持續，且範圍仍在擴大。而臺灣上空近十餘年來亦觀測到有逐漸減少的現象(陳及張，1997)。

二、溫室氣體未來濃度變化預測

使用各種不同的模式推估未來溫室氣體的變化是目前科學家採用的方法，但是要精確地推估是相當困難的，得視經濟發展、技術的改變以及地球-大氣系的物理、化學與生物過程而定。由於世界經濟成長、能源價格與使用情況、土地利用狀況以及技術的改變情況等因素的不確定，預測結果也就有所差異，也具有不確定性。Lashof and Tirpak(1990) 使用四種不同情景(scenarios) 模式推算主要溫室氣體在下一世紀的濃度變化，到了公元2050年，CO_2 濃度將達410～540ppmv，CH_4 濃度為1.8～3.1 ppmv，N_2O為330～360ppbv，CFCs為 0.3～1.4ppbv。若與Dickinson and Cicerone (1986) 預估結果比較(表1)，估計值雖稍低，但兩者預測是相當接近的。IPCC(1990) 也使用各種不同情景模式推算至公元2100年大氣中人為排放溫室氣體的濃度，若以目前排放量計算，則估計到2050年二氧化碳將增加至415～480ppmv，公元2100年二氧化碳預估將達460～560ppmv。至於臺灣未來二氧化碳的總排放量，預估在2000年為223百萬公噸(較1990年排放量增加98%)，2005年為261百萬公噸(增加132%)，到了2010年將高達294百萬公噸(增加162%)。人均排放量在2000年為9.97公噸(較1990年排放量增加80%)，2005年為11.21公噸(增加102%)，到了2010年將高達12.14公噸(增加119%)。以這種年平均成長率來看，臺灣將成為全球二氧化碳成長最為快速的排放源 (謝志誠， 1997)。至於平流層臭氧未來變化，IPCC (1990) 根據模式預測，若無採取適當的減量措施以及包含異質(heterogeneous) 化學反應過程下，則到2060年平流層臭氧預期將減少25% 至50%。當然如此臭氧的改變，仍需視未來CFCs及其他溫室氣體排放量而定。

表1. 公元2050年溫室氣體濃度估計值比較(Lashof and Tirpak, 1990)

溫室氣體	Dickinson & Cicerone(1986)	SCW	RCW	SCWP	RCWP
二氧化碳(ppm)	400-600	490	540	410	420
甲烷(ppm)	2.1-4.0	2.8	3.1	1.8	1.9
氧化亞氮(ppb)	350-450	360	360	330	340
CFC-11(ppb)	0.7-3.0	1.2	1.4	0.3	0.3
CFC-12(ppb)	2.0-4.8	1.2	1.4	0.6	0.7

SCW: Slowly Changing World
SCWP: Slowly Changing World with Stabilizing Policies
RCW: Rapidly Changing World
RCWP: Rapidly Changing World with Stabilizing Policies

參、全球變遷對全球與臺灣氣象環境影響

全球環境變遷不僅是大尺度(scale) 的現象而且也是極具有區域特性的，目前大家所關切的是我們生存的環境是否有了變化。「由於人類活動所引起的氣候變化在這幾年裏成為大氣科學研究的重要題目。大部分的資料分析研究大都集中在溫度的變化，少部分則集中於降水的變化，積雪和覆冰的的變化以及海面變化」(吳明進， 1992)。溫室氣體濃度的增加，很顯然的未來將改變地球的氣候，環境與生態系統將受嚴重威脅。

而確實的影響程度及時間，將視未來溫室氣體排放、其他氣候作用量(forcings)的改變以及氣候系統對干擾的敏感性而定。

一、氣候的改變

㈠氣溫

1. 全球氣溫變化與預測

觀測與古氣候證據顯示，由過去幾百萬年以來到最近幾年，地球上氣溫已有所變化。過去200萬年間，全球平均表面氣溫約有5℃至7℃的變化。而大約1萬年前，全球平均表面氣溫大約在2℃間上下變動，這期間出現有二次較暖期，一次約在距今5000～6000年前，另一次發生在西元950～1250年，然後在西元1400年後進入小冰期。再從最近100多年來氣溫顯示(圖4)，1940年代處於低溫期，1975年以後氣溫就明顯上升，1980年以後，全期進入暖期，5個高溫年均出現在這年代以後。自1860年以來全球氣溫已上升約0.6℃。此一全球增溫趨勢，在區域與季節而言，冬季較夏季明顯，而高緯度地區也較低緯度明顯(IPCC, 1990)。至於全球平均日最高溫與最低溫變化方面，1950年來全球增溫主要出現在夜晚，所以平均日最低溫上升幅度高於最高溫，因此平均日溫差持續下降，同時由表2顯示，增溫冬季高於夏季(柳中明，1997；Easterling, 1997)。

在考量未來全球溫室氣體持續增加，英國研究單位Hadley Center (1995) 採用全球環流模式(GCM)，估算2100年時全球氣溫將上升3℃，相當於每十年上升0.3℃。另外，IPCC(1990)估計在二氧化碳濃度倍增下，全球平均表面溫度將上升1.5℃～4.5℃，而平流層將降溫。若考量下一世紀全球溫室氣體排放受控制下，IPCC (1996) 估算2100年時全球氣溫將上升1.3℃～2.5℃ (圖5)。

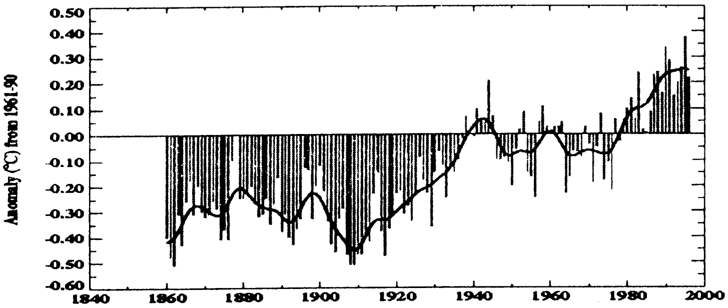


圖4. 1860～1996年間，逐年之全球近地面(包括陸地與海洋測站)氣溫平均值，減去1961年～1990年間全球平均氣溫，所得之長期氣溫距平圖。圖中實線為五年移動平均線(Hadley Center；柳中明，1997)

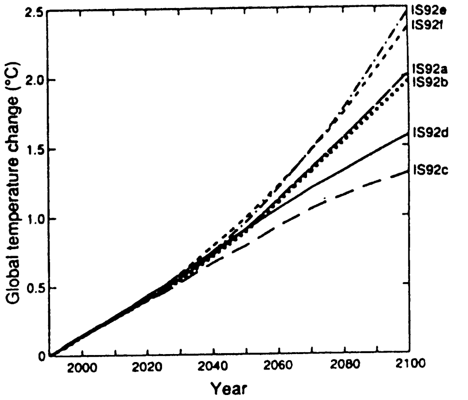


圖5. IPCC(1996) 所預測在不同之未來全球二氧化碳增加情景下，全球變遷在21世紀內之增溫情形

表2. 1950～1993年間全球、北半球與南半球之最高溫、最低溫與日溫差變化趨勢(℃／百年)
(Easterling,1997；柳，1997)

季節	趨勢(℃/百年)					
	最高溫		最低溫		日溫差	
			全球			
12月～2月	1. 10	(1. 31)	2. 48	(2. 76)	-1. 35	(-1. 37)
3月～5月	1. 25	(1. 17)	2. 26	(2. 27)	-1. 04	(-1. 09)
6月～8月	0. 47	(0. 40*)	1. 13	(1. 12)	-0. 65	(-0. 69)
9月～11月	0. 05*	(-0. 01*)	0. 94	(0. 98)	-0. 89	(-0. 92)
			北半球			
12月～2月	1. 26	(1. 52)	2. 74	(3. 04)	-1. 44	(-1. 48)
3月～5月	1. 39	(1. 29)	2. 28	(2. 30)	-0. 90	(-1. 01)
6月～8月	0. 25*	(0. 25*)	1. 05	(1. 04)	-0. 79	(-0. 77)
9月～11月	-0. 12*	(-0. 01*)	0. 72*	(0. 83)	-0. 84	(-0. 90)
年	0. 77	(0. 87)	1. 74	(1. 84)	-0. 89	(-0. 89)
			南半球			
12月～2月	0. 66	(0. 62)	1. 61	(1. 66)	-1. 00	(-0. 93)
3月～5月	0. 59*	(0. 55*)	1. 98	(1. 97)	-1. 37	(-1. 31)
6月～8月	1. 27	(1. 18)	1. 41	(1. 40)	-0. 08*	(-0. 12*)
9月～11月	0. 69*	(0. 84)	1. 74	(1. 69)	-1. 08	(-1. 02)
年	0. 91	(0. 84)	1. 81	(1. 80)	-0. 59	(-0. 60)

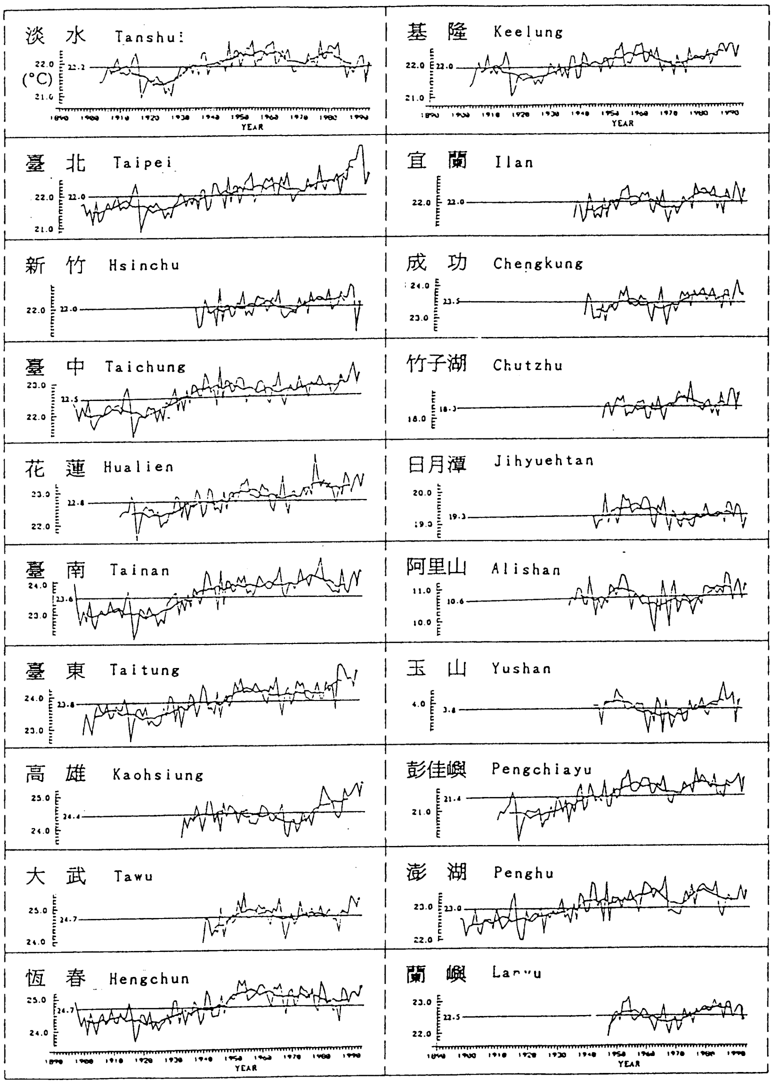
*沒有達到95%統計顯著度(t檢定)

2. 臺灣地區氣溫變化與預測

圖6為臺灣各氣象站近百年來年平均氣溫的變化。自1897-1920年間是本省有紀錄以來之低溫期。此後氣溫即逐漸上升，至1950年代達最高點後，普遍略有回降的現象，至1970年代各站升降不一，到1980年代後有較大氣溫升高現象，而大城市增溫較小市鎮及高山離島顯著。至今氣溫大約升高1℃(中央氣象局，1994)。在平均日最高溫與最低溫，長期而言，均有一緩慢上升趨勢(圖7)，但最低溫比最高溫上升趨勢明顯(沈等，1998)。而全省各月氣溫變化，上升趨勢最明顯的為夏季(五月及七月至十月)，但冬季上升趨勢較不明顯(十二月及一月)。由於冬季及夏季溫度趨勢的差異，使得冬夏季間的年較差增加。由以上資料顯示，臺灣年平均氣溫升高趨勢，與全球變遷暖化趨勢是一致的，但在季節變化上，台灣夏季較明顯，而全球是冬季較明顯，「由此可見全球變遷的大趨勢中，臺灣氣候的變化有它獨特的結構」(吳，1992)。

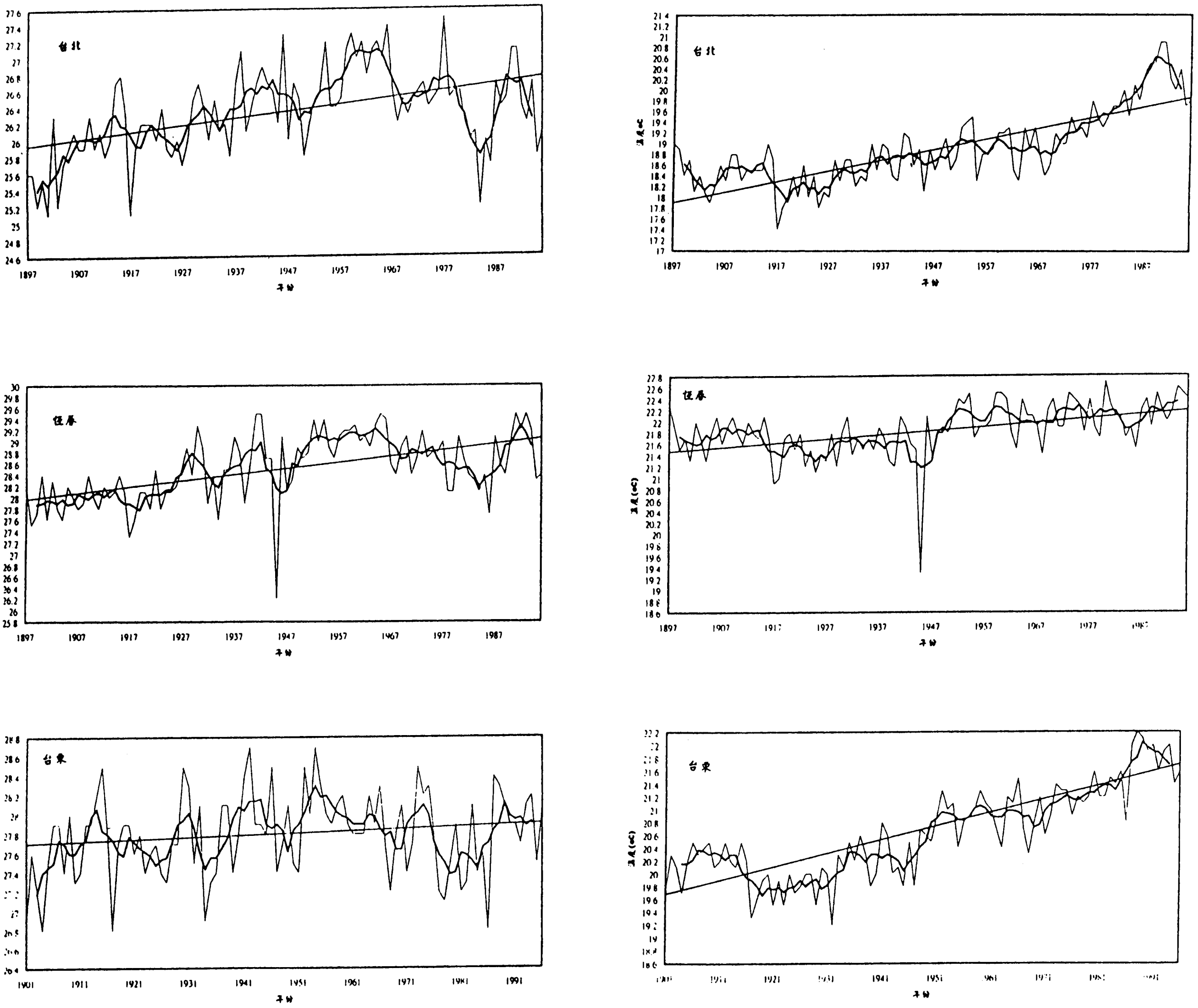
「大致上，全球正邁向暖化的看法，已多為科學界所接受。但是在暖化過程中，各地氣候改變情形，則受限於目前電腦模擬程式的能力，並無法明確模擬成功，特別是像台灣這麼小尺度的探討方面」(許，1997)。利用全球環流模式模擬結果(環保署，1994)，預估2050年時臺灣地區冬季氣溫約有3.5～4℃，夏季3～3.5℃的上升趨勢。梁等(1997) 使用Simmeteo 的蒸發散量動力模式

，模擬當二氧化碳濃度加倍時，臺灣溫度上升約1.9～4.9℃。平均最高與最低氣溫方面，台北平均最高氣溫將從25.9℃增至27.8℃，高雄從28.4℃上升至33.3℃；最低氣溫台北從18.9℃上升至20.8℃，高雄從21.5℃上升至23.3℃。除了數值模式外，柳中明等(1994)採用半經驗法，一方面使用全球環流模式所估算得二氧化碳濃度增加達工業革命一倍時，東亞地區之綜觀天氣形態；另一方面採用主觀的長期氣候分析經驗，判斷當時天氣形態下，臺灣氣候變化情形。所得結論是臺灣附近溫度上升約3～4℃，夏季上升幅度大，冬季較小。不過他們認為這個結果應再參考近日的研究資料進行修正為上升約2～3℃。



年平均值，　— 移動平均值，　數值—— 總平均值

圖6. 臺灣地區各氣象站年平均氣溫變化(中央氣象局, 1994)



日最高溫　　日最低溫

圖7. 台北、恒春及台東等三站，近百年來平均日最高溫與日最低氣溫之變化及迴歸線趨勢圖(沈鴻禧，1998)

㈡降水

1. 全球降水變化與預測

由於降水隨時間與空間變化很大，因此比氣溫更難監測，且尺度更小，尚不可能推斷全球或甚至半球降水的改變。然而過去百年來資料顯示，某些區域已有變化。降水分析上得到結論為：北半球中高緯度降水增加，副熱帶地區降水減少。在南半球是不分高低緯度降水皆有增加。

至於未來當二氧化碳倍增時，模式預測全球平均降水將增加3～15％，增溫愈大，降水增加愈多。高緯度地區全年降水增加，而中緯度冬季增加，副熱帶乾燥區降水則變化很小(IPCC, 1990)。

2. 臺灣地區降水變化與預測

圖8為臺灣各氣象站年雨量之年際變化，變化趨勢因地點而各不相同，且不同時段有其趨勢變化的特性存在。以近三十年

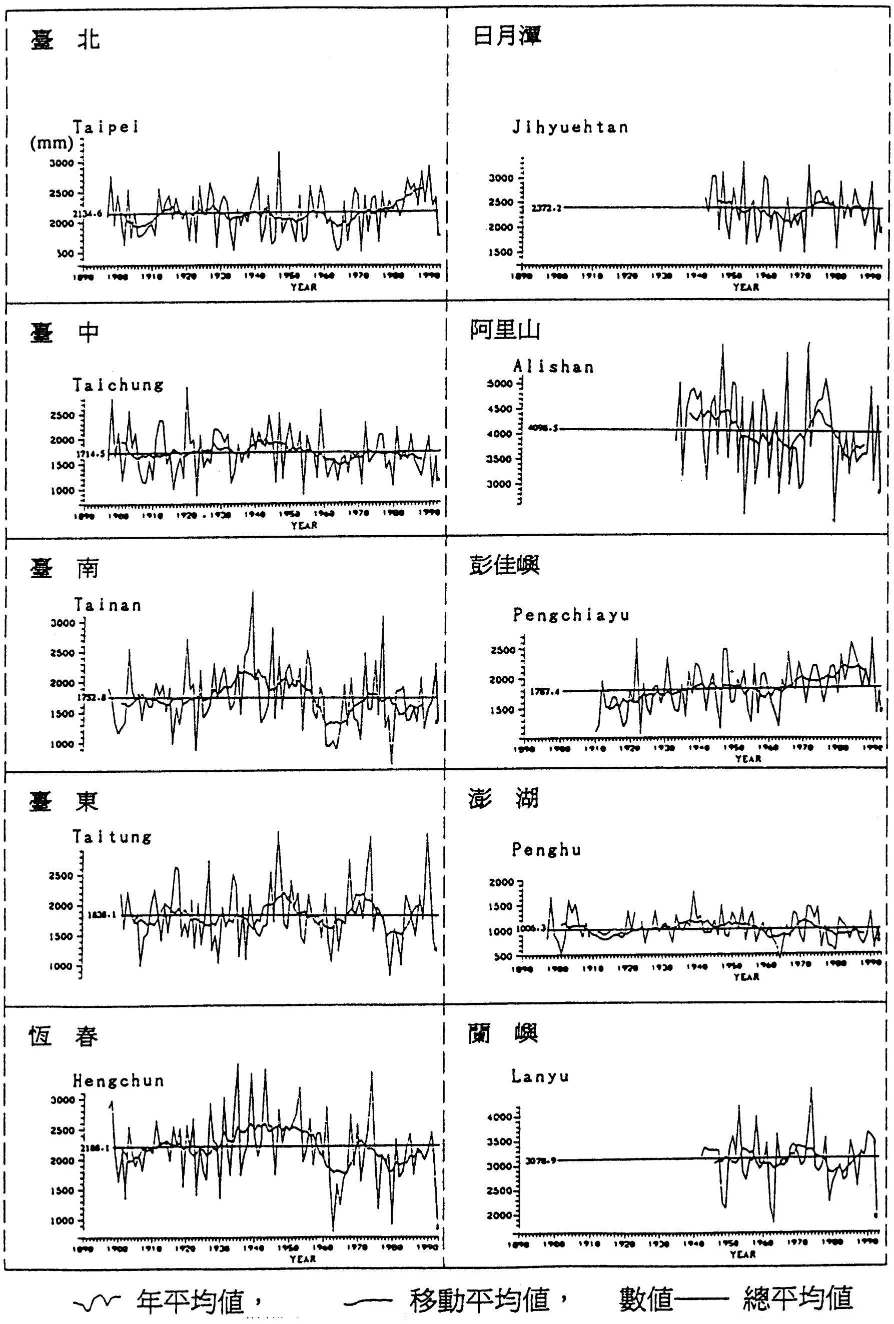


圖8. 臺灣地區各氣象站年平均降水量變化(中央氣象局，1994)

來的資料看，1960年代為雨量偏少年代，1970年代南部雨量增加，而其他地區變化不大。至1980年代以後，北部及東部年雨量增加，但1990年起則有減少的趨勢。而中南部由1980年代以後並無顯著變化的情形，但是處在較少雨的情況。因此由歷年變化趨勢，全年降水在東部、北部增加(約5%)而西南部減少(約10-20%)的情形(中央氣象局，1994)。在季節變化方面：降水量在冬季東部、北部增加，而中南部略減；春季各地降水量減少；梅雨季早期減少而後期增加；夏季各地降雨量減少；秋季東部增

加，中南部減少(吳，1992)。

至於未來當二氧化碳濃度倍增時，降水變化又如何？模式模擬結果(梁，1997)年降水量將約略增加2%，夏季增加而冬季減少。環保署(1994)亦預估2050年時，降水量在冬季少約5～10%，夏季則增加5～10%。柳等(1994)亦預估CO_2倍增下，冬雨與梅雨降水量將減少。劉及曾(1998)使用氣候模式模擬，臺灣冬季降雨量亦有減少的相同結果。

㈢溼度與蒸發量

臺灣地區年平均相對溼度近卅年來除高山離島外，普遍下降了2-5%。至於蒸發量的長期變化，就其近十年之趨勢看，約下降了有100-400公厘之不等量(中央氣象局，1994)。這二項氣象要素的變化都有減少趨勢。模式預估，在二氧化碳倍增下，全球平均蒸發量將增加3～15%(IPCC, 1990)，全球對流層中水汽含量也將增加20%～33%(Hansen *et al.*, 1984; Trenberth *et al.*, 1987)。雖然溫室氣體增加對氣象影響是增加大氣溫度，提高陸地及海洋水份的蒸發速率，增加空氣中的水汽。然而這些影響不是一個平均分佈的地理現象，且其影響程度將隨各地的環境而有所不同。雖然環境問題是全球性的，但區域上本身也具有自己氣候上的特性。且影響氣候因素也不是單一作用，而是要多方面考慮的。

㈣紫外線輻射

圖9為設置於中央氣象局所屬的台北及成功兩氣象站之布魯爾分光光譜儀1993年至1996年紫外線輻射量月平均趨勢變化。從圖中可知紫外線輻射的季節變化是很明顯的，一般而言，以夏季的7月最高，冬季之12月或1月最低。而成功的月平均值皆大於台北。月平均的最大值出現在成功1996年7月，其值為5366.8焦耳／平方公尺，而台北的月平均最大值從1993年起，有逐年增加之趨勢，1996年7月為3704.9焦耳／平方公尺。而月平均最小值是出現在台北1993年12月，其值只有651.5焦耳／平方公尺，且台北及成功二站之紫外線輻射的月平均最小值從1993年起，皆顯示逐年增加的趨勢(陳及張，1997)。

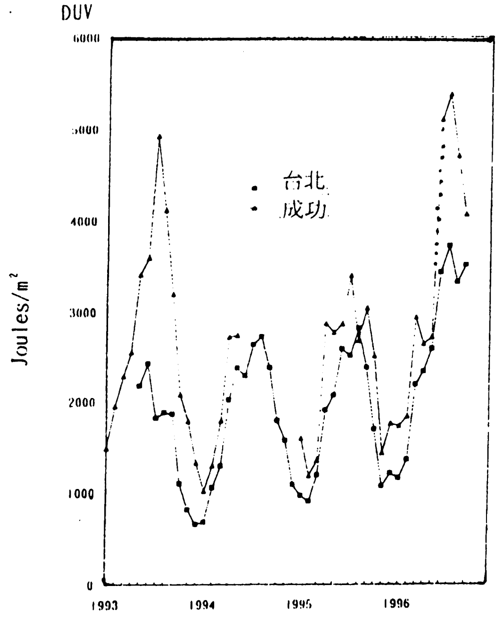


圖9. 1993年-1996年間台北及成功兩測站月平均紫外線輻射之變化(陳及張，1997)

由以上的評估報告，可歸納出未來氣候的變化：全球有暖化的趨勢，而這趨勢以高緯度較低緯度、冬季較夏季明顯，而且可能有一因氣候變化引起的降水區移動的趨勢。在北半球溫帶和極區降水增加，熱帶地區有降水減少趨勢，在南半球有降水增加趨勢。至於臺灣地區的氣候有可能變為高溫及冬乾夏溼的氣候型態。

二、災害性天氣

在探討氣候變遷的問題中，除「氣候暖化」的研究與衝擊受到重視，「氣候變異性」(climate variability) 所導致的災害性天氣更格外引起國際間的注意。變異性與異常事件頻率的改變可能比平均氣候改變有更多的衝擊，尤其是異常氣候所造成的損害可達相當嚴重的影響。以最近數年內全球某些地區與臺灣本島所出現的多次破記錄異常氣候現象為例，就可發現氣候變異性所致的災害性天氣，更會在短時間內，危害人們的生命財產，並對整個社會之整體經濟建設造成相當大的危害。

在國際間，近年來各地豪雨、洪水出現頻繁；同時乾旱、飢荒問題不斷。以最近三年為例，1996年元月初，美國東部發生大風雪，爾後的大雨與融雪，導致嚴重的水災。接著中旬在中西部遭遇暴風雪侵襲。北韓夏天則遭受歷年來最嚴重的水災。7月底至8月初，臺灣地區遭受賀伯颱風侵襲，造成近550人死亡、失蹤與受傷，約200億農業損失，無以數計的房屋、橋梁、道路、堤防等遭土石流、海水暴漲等沖垮破壞，為近卅年來傷亡最慘重的風災，同時阿里山的日降雨量也創歷史新高。而1997年，北韓發生史上罕見的乾旱與高溫，造成嚴重的糧荒。而這年全球表面的氣溫也創有紀錄以來最暖的一年。3月底歐洲及俄羅斯發生暴風雨，導致10人死亡；4月初美國東北部受暴風雪侵襲；4月及6月中國大陸的豪雨，導致近200人傷亡；臺灣地區則在6月中旬、7月初及8月7日等一連串的豪雨成災，造成相當嚴重的災情；接著8月的溫妮颱風，造成大台北地區房屋坍塌等重大傷亡；8月底安珀颱風來襲，造成農業損失達10億元以上；9月，因印度洋東岸及印尼的旱災，引發延燒蘇門答臘和婆羅州森林大火，導致東南亞地區歷年來最嚴重的霾害；12月美國南加州又暴雨成災。至於1998年，年初日本東京及周遭平原地區受大風雪侵襲，造成2人死亡，500多人受傷；美國東北部及加拿大東部發生冰暴；中東地區受到6年來最大的暴風雪侵襲。而臺灣在2月竟遭受罕見冰雹及龍捲風的摧殘，造成高達13億多元的農業損失。

在臺灣，大家比較關心的災害性天氣，主要是來自於颱風、豪雨、乾旱與寒潮等四大氣象災害。其中，颱風方面主要在掌握其進行路徑、強度變化、侵襲區域與風雨災等災害預測。乾旱方面，乾旱雖導源於長時間內大氣環流之異常，臺灣主要為需求性乾旱，也即是供水需求逐年增加下，自然降雨卻未同步增加，所形成的乾旱現象。另一方面，臺灣因中央山脈縱貫南北，地形因素，使西南部地區於每年十月至翌年四月間呈現少雨的乾季，若春雨不顯著則春季乾旱的機會勢必浮現。再者，若當年梅雨不顯著或沒有颱風帶來足夠的雨水，則全省將普遍呈現乾旱現象，造成嚴重缺水，因此基本上水資源有效的管理與分配顯得重要。寒潮方面，全球暖化增暖下，模式顯示，中高緯度及冬季變化較明顯，如此推論，寒潮發生頻率可能減少，但其變異性將加大。寒潮定義因地而異且寒潮的爆發與極地高壓及鋒面過境有密切關係，隨綜觀尺度大氣環流而變，其源地與路徑也會造成不同的影響。而在豪雨出現頻率方面，柳等(1994) 分析1900年至1994年11月中央氣象局所屬各地面氣象站資料，各站所曾經出現之最大三次暴雨的日期，再將這些資料以時間系列，計算每5年內雨量曾經出現最大三次豪雨的頻率，結果顯示，無論平地、高山與離島測站，豪

雨出現頻率約自20世紀初的2% ，不斷上升至近期的18% 。類似的分析結果在日本(Takedo, 1993) 、美國(Bruce, 1994) 均被提出，即近年來各地出現豪雨的機會愈來愈高，其可能造成的危害性將趨於嚴重。

至於未來在二氧化碳倍增下，氣候變異性的改變將如何？IPCC (1990) 綜合各種模式的預測結果如下：天氣逐日變化的改變不確定，但是高溫事件未來將更頻繁；平均降水增加的地方，降水變異性增加，反之，變異性減少(Wilson and Mitchell, 1987; Rind *et al.*, 1989) 且對流性降水頻率增加(Noda and Tokioka, 1989) ；因低層南北溫度梯度的減少，冬季中緯度風暴日與年際變化可能減少；模式模擬顯示，若熱帶地區海水溫度上升，熱帶風暴(颶風、颱風、氣旋) 發生頻率、強度與產生區域可能增加,但此結果尚未有一致性的結論(Emanuel, 1987; Merrill, 1988) 。此外，降雨型態改變也可能導致洪氾或乾旱發生機會增加(楊，1993) 。

近年來聖嬰現象(El Nino) 受到大家的注意，因為它的發生對全球氣候的影響甚鉅。聖嬰原先視為是南美洲沿岸從厄瓜多爾到秘魯海面海水溫度突然增暖的一種現象，現在已廣泛地視為發生在赤道東太平洋地區海水溫度異常增暖的現象，一般約二至七年間會發生一次，當聖嬰發生時，赤道東太平洋海面水溫突然上升，而後持續一段時期，這種現象在南半球的初夏(十二月) 特別顯著，總在聖誕節前後發生，當地原來盛行的冷洋流不見了，海面升高，湧昇流 (upwelling) 減弱，魚兒因缺少食物而他遷或死亡，鳥類也因而絕跡，當地居民賴以維生的資源一下子枯竭，由於此暖洋流的出現，常在耶穌誕生時來臨或達最高潮，所以稱為聖嬰，為西班牙語「上帝之子」的意思。20世紀初氣象學者Gilbert Walker發現澳洲達爾文 (12.4°S，130.9°E) 與南太平洋的大溪地(17.5°S，149.6°W) 間的海平面氣壓呈現相關性極強的互動變化，展現一種蹺蹺板上下振盪 (seesaw) 作用，稱之為南方振盪 (Southern Oscillation) 。當聖嬰現象發生時，許多地區的氣候變動，似乎都符合南方振盪的關係，因此乃合稱之為聖嬰 / 南方振盪 (El Niro-Southern Oscillation) 簡稱ENSO。因此ENSO乃是一種在熱帶太平洋地區結合海洋與大氣變化的現象。ENSO發生時，除對低緯度地區東、西太平洋沿岸國家帶來異常或劇烈的天氣變化，導致災害外，甚至牽連到地球上其他地區，較明顯的影響有：南美洲豪雨，澳洲、印尼、菲律賓、非洲南部與衣索匹亞等有乾旱發生，美國西海岸風暴增多，常導致加州豪雨與大風雪，加拿大西南部及東部通常較暖和，獨立國協的暖冬等。至於聖嬰對臺灣的影響，聖嬰與臺灣地區冬天的溫度、侵台颱風頻率及春天的雨量有較明顯的關係。聖嬰年冬季平均氣溫偏暖機率較高，但各個月份氣溫不一定都偏暖，其中以十一月、十二月機率最高，其他月份冷暖發生機率相差不大。颱風侵台數在聖嬰年有偏少趨勢 (Chang, 1996) 。在春雨方面，若冬季是處於較強的聖嬰狀況時，則次年二、三月臺灣地區降雨偏多，春雨會較明顯(廖，1995；吳，1996) 。ENSO的發生因為海溫上升幅度的不同，可歸納為弱ENSO或強ENSO。歷年來以1982-1983年所發生的ENSO現象最強，而1997-1998年發生的ENSO至目前為止，其強度並不亞於1983年。而近年來ENSO發生頻繁，原因至今仍不清楚，有待大氣科學家進一步的研究探索。

近年來，國際間透過密切的合作觀測如熱帶海洋暨全球大氣計畫(Tropical Oceans and Global Atmosphere Programme; TOGA)，已對ENSO發生時的大氣與海洋變動，收集相當多的資料。例如：在中太平洋近赤道海域，在TOGA計畫內布建了許多即時海洋觀測站，可以提供即時的海面溫度資料。科學家們也成功地利用海氣偶合模式(coupled ocean/atmosphere model) ，依據海溫

及大氣條件預測未來一年或一年以上聖嬰現象發生的海溫變化趨勢。而成功的海溫變化預測可以讓科學家們對特定區域的氣候變化進行實驗性的預報,各國政府就可以依據這樣的氣候預測，作出適當的因應對策，譬如在乾旱年與潮溼年分別栽種不同類型的農作物，以及事先作好災害的有效預防措施。

美國自1992年里約熱內盧地球高峰會議以來，就在推動成立國際氣候研究院(International Research Institute for Climate Prediction; IRICP)，希望在全世界各國的通力支持下，獨立於各不同行政組織之外，專門進行短期氣候預測，並希望協助各國充分利用氣候預測資訊，事先進行農業、漁業甚至基礎建設之規劃。IRICP就是在上述ENSO已可被預測並作最有效利用的前題下，由美國科學界與國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmosphereic Administration; NOAA)策劃下，IRICP於1996年和哥倫比亞大學及Scripps海洋學院簽定合作協定，開始它的基本運作功能，希望世界各國共同合作，整合所有觀測及模式方面的努力，做成氣候預報以及相關的預報產品，利用這些結果來減少甚至避免氣候變異所致災害性天氣所造成的損害。

由於全球氣候變異顯著，我國氣候亦受干擾，因此如何積極推動國內氣候研究與預測工作，以降低異常氣候所致災害性天氣對我國之損害，實屬刻不容緩。身為地球村的一份子，我國已計劃加入此一國際組織，參與IRICP之相關研究工作，並可獲得最完整的全球短期氣候預測及其評估之資訊，同時提升我國氣候研究、預測及應用之能力與水準。近年來，中央氣象局一直努力於改進氣象預報技術，提高預報準確率，尤其是災害性天氣的預警。同時也加強防災的宣導與教育。因此精確的預報及有效的預防措施，才能減少氣象災害所造成的損失。

三、海平面上升

全球海平面過去100年平均上昇10到20公分，未來仍將持續上昇，依據IPCC(1990)的預測，西元2100年全球海平面平均上昇約66公分。這是因為全球暖化氣溫上升後，一方面海水熱膨脹，另一方面冰川與南北極冰原區溶解，所以海水位逐漸上升。至於台灣地區受到全球海水面上升的影響，從歷史潮位資料，分析基隆及高雄港之平均海水位。基隆港自1957年至1979年似有逐漸下降的趨勢；但自1979年起又有逐漸上升的趨勢，1979年出現的最低平均海水位為82.8公分，而1991年的平均海水位為96.6公分，二者相差了13.8公分。高雄港的平均海水位較基隆港為低，但變化較大。整體看來，高雄港的平均海水位是有逐漸上升的趨勢，在1973年的最低海水位為66.7公分，在1991年的平均海水位為84.1公分，兩者相差了17.4公分。以上基隆港和高雄港的平均海水位變化，在未考慮地層下陷等其它因素的影響下，最近十年均有上升的趨勢(中央氣象局，1994)。

至於未來全球海水位變化如何？除前述ICPP(1990)的估算外，其它相關的估算研究相當多(IPCC，1990；1992)，其中以Wigley (1995)為較具代表性，其所得結果如表3。表中所示乃是估算未來如果全球大氣二氧化碳濃度達到350~750ppmv間，2100年與2500年時全球氣溫與海水位的上升幅度。此估算結果在21世紀內，每十年氣溫約上升0.24℃，海水位約上升4公分。

全球海水位上升，比較明確的就是造成沿海岸土地的淹沒，當然以沈積平原最容易受損。美國環保署依據Strzepek and Smith(1995)所估算之阿根廷、孟加拉、中國、埃及、馬來西亞、尼日、塞內加爾、烏拉圭及委內瑞拉等國家，在全球海水位上升1公尺時，土地面積將喪失的幅度，以及可能受影響的人口(表4)。其中孟加拉約17.5%的土地面積可能淹沒，一千三百萬人口將受影響；中國大陸則有約十二萬五千平方公里面積淹沒，七千二百萬人口將受

影響。表4的估算是以溫室效應造成全球海水位上升一公尺為基準，若與表3資料相比較，全球海水位可能在22世紀內才會上升達到這個幅度。但是一般尚需加入考慮人為海岸開發的因素如超抽地下水等，所造成地層下陷的情形，如此則整個海岸流失的問題就更形嚴重。土地淹沒對許多島國影響最大，海水面上升後，除海岸土地淹沒外，海岸將受侵蝕，以及海岸線後退。國土的流失，受害最大的就是沿海村落必須面臨遷徙的命運，以及接踵而至的社會調適問題。同時鹽水入侵，使得沿岸能被開墾利用的土

表3. 在固定大氣CO_2濃度下，公元2100年與2500年全球氣溫與海水位上升幅度(Wigley, 1995；柳，1997)

二氧化碳濃度	全球氣溫上升(℃)		海水位上升(公分)	
ppmv	2100年	2500年	2100年	2500年
350	1.1	0.7	16	21
450	1.6	1.8	26	59
550	2.0	2.6	32	87
650	2.2	3.3	36	109
750	2.4	3.7	40	128

表4. 海水位上升1公尺下，部分濱海國家可能喪失之土地面積，以及可能受影響之人口(Strzepek and Smith,1995；柳，1997)

國家	可能淹沒面積		可能受影響人口	
	平方公里	%	百萬人	%
阿根廷	>3,430~3,492	>0.1	--	--
孟加拉	25,000	17.5	13	11
中國	125,000	1.3	72.0	6.5
埃及	4,200~5,250	12~15	6.0	10.7
馬來西亞	7,000	2.1	--	--
尼日	18,398~18,803	2.0	3.2	3.6
塞內加爾	6,042~6,073	3.1	0.1~0.2	1.4~2.3
烏拉圭	94	<0.1	0.01	0.4
委內瑞拉	5,686~5,730	0.6	0.06	0.3
總計	194,852~196,498		94.4~94.5	

地減少。

其次，平均海水面上升將抬高波浪、潮汐與暴潮侵蝕海岸之基準面，也影響到近岸之波高。由於波能與波高成正比，因此近岸波高增加，也將提高防波堤的設計高度及成本。另外，海水面上升，將改變潮汐系統，同時增高暴潮幅度。大略上，最高海水面為平均海水面及平均高潮位與暴潮三者

之和，尤其在颱風侵台時，最高海水面將因此明顯上升，這將對海岸工程建設與開發，造成嚴重衝擊。以臺灣東岸港口為例，1994年7月提姆(TIM)颱風侵台時曾出現17.5公尺的最高海水面，僅較太平洋內曾出現之最高水位18公尺略低，當時曾造成相當損害(施，1997)。又如位於南太平洋的島國吉里巴斯共和國首都所在的塔拉瓦島於1997年2月和8月兩次空前大漲潮使得整個島泡在海水中，現在島上四處可見因海岸流失而崩塌的建築，泡在水中的道路、民房，而距塔拉瓦島一公里之遙的比凱曼島數年前則早已沒入海中。

施(1997)更指出，臺灣西部海岸普遍存在的地層下陷現象，比較嚴重的地區一年下陷量即可達20公分，也使海平面相對上升，因此臺灣海岸將與其它海洋國家一樣，面臨海岸侵蝕日益嚴重的衝擊。大致上，東部海岸光復後即呈侵蝕；西部海岸也逐漸由堆積進入侵蝕期。

肆、因應策略

一、溫室氣體減量

IPCC在1996年報告中指出，科學證據支持氣候變遷主要乃人為造成，溫室氣體的減量排放將有助緩和溫室效應。因此針對溫室效應問題及溫室氣體減量策略，進行相關管制與規範，以避免氣候系統繼續遭受破壞，危及生態環境。為了達到溫室氣體的減量目標，可從能源措施、全面禁止氟氯碳化物使用、禁止森林砍伐及改進水田耕作與畜牧等農事技術上著手。

㈠能源措施

抑制溫室氣體排放最主要的是抑制二氧化碳排放，而能源消耗為二氧化碳排放最主要來源。因此在能源管制措施上，柳等(1997)提出下列幾點建議，以降低二氧化碳排放。

1. 重整能源結構及提高能源效率
   (1)儘速修正台灣能源發展方案，降低化石燃料的使用比率，加強再生能源的開發利用。
   (2)積極引用複循環機組發電以提升發電效率。
   (3)加強電力負載管理，減少尖峰用電需求。
2. 調整產業結構
   (1)鼓勵業者發展低耗能、低污染或附加價值高之產業，加強改善或淘汰高耗能、高污染之產業，促進產業升級。
   (2)調整能源價格，以價差推動產業，加強能源使用效率。
   (3)增強現有法規及經濟誘因，鼓勵產業界發展省能源、高效率之設備及器具。
3. 在運輸部門方面
   (1)改善道路交通系統，減少塞車頻率以提高燃料使用效率。
   (2)增加大眾運輸的便利性，以減緩小客車的快速成長。
   (3)積極研發替代性低污染燃料，取代傳統汽柴油車輛。
4. 強化節約能源觀念的推動及教育宣導

不過，上述這些能源措施均非在短期內可以看到成果。因此，「現階段當以提升全民對下一世紀全民對能源議題的重視為重點，並積極鼓勵相關學術研究發展，與民間實務推動，同時協助政府訂定適宜策略，方可逐步改變能源供應結構，提升能源使用效率，有效抑制二氧化碳排放等」(柳等，1997)，以減少氣候變遷對我國之衝擊。

㈡森林策略

每單位面積森林所儲存的碳量約為農地的20～100倍之多，因此在地球碳循環裡扮演著臨界角色。維持大量樹木生質；保護熱帶雨林，減少熱帶森林砍伐；在多餘的農地或劣質土地上從事大規模植樹造林等積極性的森林管理，對減緩大氣溫室氣體效應提供了重要的潛力。目前因森林砍伐每年約排放10-20億公噸的二氧化碳至大氣(Houghton *et al.*, 1987)，如推行森林策略和禁止森林砍伐，則整個生物圈每年可以

吸收7億公噸的二氧化碳，能減少溫室效應7%左右。在森林策略與措施上可由下列幾項著手：

1. 實施永續的、整合的森林與自然資源管理體系以及永續農業技術。
2. 透過環境計畫和管理，減少開發過程中森林的損耗。
3. 改善火爐與工業用途生質燃燒效率。
4. 減少生產可任意處置之森林產物(如紙、筷子等)，以生產耐久性木材或其他物品代之，且制定木製品回收計畫。
5. 增加森林生產力
6. 加強森林砍伐(收獲)效率。
7. 在溫帶區的農地及都市土地種樹。
8. 在熱帶區劣質林地重新造林與植樹。

㈢農業策略

源自農業生產所排放的溫室氣體主要經由稻米耕作、氮肥使用與家畜類腸的發酵作用等三種途徑而得。稻米耕作與家畜每年產生的甲烷佔全球甲烷產生量分別為20%及15%。而氮肥使用每年產生的氧化亞氮佔全球N_2O排放量的1～17%間。農業生產本身所排放的溫室氣體與可採行之減量措施的潛在效力及代價兩者皆是不確定的。在農業活動的利益上有相當多的研究，但與農業有關的溫室氣體排放及不同農業生產方式的改變對排放的影響程度等問題上則較少注意。以下將就這三項農業生產所排放的甲烷與氧化亞氮等溫室氣體的減量措施，作因應策略之建議：

1. 稻米耕作之策略

甲烷的產生受到稻米生長階段、溫度、灌溉、肥料使用、存在的有機物、稻米品種及稻米收穫量與時間影響(Fung *et al.*, 1988)。因此可由上述幾項因素採取控制措施，來減少甲烷的排放。

(1)調整稻米生產體系

水田產生的甲烷比旱田多，全球稻田面積水田約佔87%之多，故減少水田耕作面積可降低甲烷產生。另外浸水深度及浸水時間也影響甲烷產生率，灌溉管理方式需改善。

(2)改進稻米品種

短、硬梗的稻米品種有機物分解較少，高產量品種有較短的生長期，皆能減少甲烷的釋放。

(3)土壤改良與養分管理

施用在稻田上有機物的種類與數量影響甲烷產生。少用有效性碳含量高的有機物，多使用木質素量高之植物。多使用有機肥料減少化學肥料、農藥之使用。

(4)作物殘渣的有效利用

燃燒殘渣釋放二氧化碳，掩埋殘渣或混入水稻產生甲烷。應將稻草作有效的使用，例如作為飼料、燃料、纖維及建築材料等。

2. 氮肥使用策略

氮肥施肥土壤產生的N_2O主要是經由脫氮(denitrification)與硝化(nitrification)作用過程。因施肥每年所排放的N_2O約0.14～2.4TgN(Fung *et al.*, 1988)。工業國家氮肥使用每年增加1.3%，開發中國家每年增加4.1%(World Band, 1988)，預計到2050年全球肥料消耗將增加到1990年的3.5倍(Frohberg *et al.*, 1988)。因此有效的肥料經營策略，才能降低肥料使用需要，而減少N_2O的排放。

(1)使用低N_2O排放率的肥料

氮溶液、尿素、無水氨等氮肥所排放的N_2O是不盡相同的，因此如何針對不同作物情況，使用適當的肥料需要作調查。

(2)減少施肥量及適時施肥

依照植物需要調整肥料使用，將改善肥料使用效率。另外，秋季施肥所排放的N_2O超過春季(Bremner *et al.*, 1981)，因此適時施肥可減少土壤N_2O的排放。

(3)改變施肥方式

深放肥料比散播及手方式的施肥更能抑制氮的損失，改善施肥方式，能減少N_2O的排放。

(4)改進水管理

間歇性的水稻田注水增加氮的損失與N_2O的產生(Eriksen *et al.*, 1985)。因此灌溉

的調節，適當的浸水狀態是值得加以探究的因應措施。

(5)使用適當耕耘方式

試驗顯示，在非耕耘體系下比在傳統的耕耘體系下耕犂會排放較高的N_2O。這是因為配合非耕耘體系需多施肥及增加除草劑的使用(Groffman *et al.*, 1987) 。因此針對非耕耘系肥料使用方法的發展是值得深入研究。

(6)改善施肥效率技術

在肥料裡添加氮化合與尿素抑制劑能夠經由揮發而減少氮的損失(Stangel, 1988) 。將肥料包裹以硫磺或使成顆粒狀以限制或阻礙水的溶解。發展減緩釋放或適時釋放的施肥技術，以減少排放率。

3. 家畜類甲烷排放減量策略

目前家畜每年所排放的甲烷約65～100 Tg，而大部分來自於反芻動物的排放，約佔97％，非反芻動物僅佔3％。來自家畜所排放的甲烷受到飼料品質與量以及動物體重、年齡、活動力及種類等差異而有所不同。因此針對上述因素謀求策略必可減少甲烷的排放。

(1)提高家畜體系的生產力

集中管理、高生產力的家畜體系是最有效率的生產方式，能以最少甲烷排放量，產生更多的肉品(Moe and Tyrell, 1979) 。

(2)飼料添加物的使用

使用一種名為ionophores抗生素的飼料添加劑餵食食用牛，能改善反芻消化效率，緩和瘤胃的發酵作用，減少甲烷產生(Johnson, 1988) 。

(3)多飼養非反芻的家畜，如豬、馬等，少養牛、羊等動物。

(4)家畜糞便廢棄物利用

糞便在無氧情況下經微生物分解而產生甲烷。在浸水田地裡的糞便容易產生甲烷。但是糞便能經過處理產生類似沼氣的甲烷氣，可當做能源使用(如電力、烹調) 。糞便經由氣態化處理不但能減少甲烷產生，作為燃料，而且其剩餘的殘渣也能當肥料使用(Winrock, 1977) 。

二、 氣候研究與預測

目前我國在氣候變遷的相關研究上還剛起步，「也因此作業與研究單位均無法拿出具區域特性，可提供我國民眾參考的國際水準級研究與實際預測成果。但在同時，國外現在正有相當多優秀且年輕的學者進行氣候變遷的專業研究，因此爭取專案研究基金，結合國內外相關學者專家，成立任務性研究中心，推動具體工作，實為當務之急」(柳及劉，1997)。基本上，氣候變遷研究及其所面臨的相關問題很多，也有很大的改善空間。許(1997)乃提出下列五點建議：

1. 利用現有資料評估台灣的氣候變遷，以探討：台灣過去百年來的氣候變遷與溫室氣體的增加有關嗎？台灣環境變遷的區域效應與溫室氣體的全球效應之間的關係為何？目前氣候模式所預測的氣候變遷，是否可用來推估台灣未來氣候變遷？
2. 加強基礎研究，以建立海陸空全面性的氣候變遷觀測網，收集完整的氣候資料；加強分析台灣過去氣候的相關資料，以了解影響台灣氣候的機制；培養區域氣候模擬能力；探討台灣氣候的可預測度(並非所有的氣候或天氣皆可預測)。
3. 參考日本最近提出之長達二十年，耗資十多兆日元的氣候變遷研究計劃，適度修正全球變遷研究的長期發展策略，考慮下列因素：以台灣觀點，排列出研究項目之優先次序；人力資源的開發；持續性；基礎研究與應用研究計劃並重；加強跨領域研究。
4. 建立資訊橋樑。
5. 加強地球系統科學教育。

另外，由於氣候變遷的預測仍存在著許多不確定性，尤其是在氣候改變的時間、幅度及區域型態相關問題上。因此為了改進預測能力需要：深入了解與氣候相關的不同過程，特別是伴隨雲、海洋與碳循

環過程；改善全球性氣候變數觀測系統，且更詳盡的探討過去已發生過的變化情形；發展改進地球氣候系模式；加強支持國內與國際間的氣候研究計畫，尤其是開發中國家；促進國際間氣候資料的開放。

三、水資源的永續發展策略

「由臺灣地區這幾年來雨量及水文的變化，旱澇次數及程度有增加的現象，全球氣候變遷對於臺灣水資源之影響，值得吾人加以特別關注」(柳及劉，1997)。郭(1997) 亦提出為了確實了解氣候變遷對水資源影響程度，基本步驟應對長期水文、氣候資料之完整收集與分析，接著必須加強水文、水資源系統工具之研發與應用。台灣地區雨量雖然豐富，年平均雨量約 1500～4500公厘，但因人口密集，加上其他許多地理上自然因素，仍就是一個水資源匱乏的地區，近年來由於社會之快速發展，不但需求性用水逐年攀升，南部地區年降雨量還有逐年下降趨勢，如果此種用水供需的趨勢不變，勢必要進行某種較精緻的水資源運用規劃，否則缺水情況將逐年嚴重。為了永續發展珍貴的水資源，在水資源開發時，必須兼顧生態平衡與和諧，另外在水資源保育、節約用水、建全水利行政組織、保護與合理使用地下水、加強旱澇災害防制等各方面均應重視落實，以提高國家的競爭力並增進人民的生活品質與福址。特別建議以下的作法：

1. 加強基本資料的收集與全球變遷及對水資源影響的研究。
2. 加強水庫集水區之保育，加速河川污染整治。
3. 加強節約用水之實施，包括開徵水權費、合理調配水資源、合理調整水價、執行水權觀念之宣傳。
4. 加強地下水保育，實施地下水與地面水之最佳聯合運用。
5. 加強洪水災害之防治，實施非結構性方法，例如洪水平原管制、洪災保險、雨水滯留等。
6. 減少旱災之機會與損失，以風險方法來規劃設計各項水利工程。
7. 健全水利行政組織與功能，使政府重視水利建設與水資源保育工作。
8. 加強愛護水資源宣傳，使全民能參與並瞭解水資源之珍貴。

四、海岸變遷因應

適應海岸變遷的策略，大致可歸納為(柳及劉，1997)：

1. 海岸原居住人口遷離。
2. 以海岸防蝕工程，維持現有海岸線。
3. 向大自然挑戰，積極填海造陸，創造新的海岸土地，如荷蘭的三角洲計畫和日本的關西機場，然此種模式需考量自然條件及工程技術的配合。
4. 加強研究全球變遷對海岸環境之影響，包括未來海水面上升速率預測的相關研究訊息，以作為制定中長期的海岸管理政策之依據。

伍、結　語

氣候變遷是大尺度全球性的問題，不但影響全球氣候及生態系統，也在區域性造成極大的衝擊，影響各國之政治、經濟及社會結構，而且造成世界各國共同必需面對的全球性災難的現實問題。由於人類活動對大氣所造成的衝擊已被公認對地球是一種潛在性的破壞。溫室氣體的持續增加，改變了氣候，使得全球趨向於暖化。但是整個全球氣候變遷的推估，仍存在著許多不確定性，雖然資料顯示，全球暖化可能已發生，但是仍受到一些爭議，例如氣溫上升幅度會如模式預測那麼高嗎？實需科學界努力去澄清。雖然如此，但大多數科學家仍普遍預期全球氣候暖化未來將持續，氣候變異增大，導致旱澇頻率增加，災害性天氣趨於更嚴重性。因此防災意識的加強，預防措施的落實，以減少災害損失是很重要的。此外，全球氣候變遷與

環境惡化對農業的永續性與全球糧食的穩定性，所造成的衝擊，也為國際間關注的焦點之一。對我國而言，實需有專責單位密切收集與分析全球糧產的變動；同時提出我國因應氣候變遷的長期糧產規劃，以免未來因加入世界貿易組織(WTO)，大量釋出農地，減少耕地面積而致出現糧產供需不足的狀況。

抑制溫室氣體的排放，尤其是二氧化碳是近年來國際間所欲達成的目標。在此全球變遷與國際環保公約的發展趨勢及壓力下，我國身為地球村一份子也將面臨這個問題，如何在影響國家利益最少情況下，將衝擊減至最小，即早並適時採取因應策略，實為當務之急。政府應儘速提出相關產業的因應方案，在溫室氣體排放減量上必需有積極動作。例如：節約能源及高效率能源政策；保護森林，禁止森林砍伐，積極從事植樹造林；改進農事作業技術，經營永續農業。同時，應仿效美國及日本等國家投入大量人力與財力成立氣候研究與預測專責機構，加強氣候變遷研究、氣候模式發展與氣候預測並積極參與國際間合作計畫；相關資料及資訊的公開以及教育宣傳。政府應與企業與民間取得共識，結合民間團體力量共同推動，不但可獲事半功倍之效，且可減輕氣候變遷對我們環境的衝擊，進而達到經濟建設與環境保護的永續發展環境，為我國締造一個雙贏的局面。

陸、引用文獻

中央氣象局. 1994. 台灣地區氣候變化之分析與評估.交通部中央氣象局編印.

沈鴻禧 王建國 鍾永明 張隆男. 1998. 全球溫室氣體對台灣極值溫度之影響研究. p. 425~430. 1998年2月23-25日「天氣分析與預報研討會論文彙編」.中央氣象局，台北市.

吳明進. 1992. 台灣的氣候-氣溫與降水. 大氣科學 20：295~317.

吳明進. 1996. 聖嬰/南方振盪(ENSO)現象對台灣短期氣候變化影響之研究-春雨部分. 中央氣象局委託研究計畫CWB 85-2m-04.

柳中明. 1994. 全球氣候變遷的不確定性：對流層內臭氧與懸浮微粒的影響. 大氣科學 22(4)：523~544.

柳中明 王維強 吳明進. 1994. 台灣地區未來氣候變遷之評估. 1994年3月18-19日「台灣地區氣候變遷因素及影響研討會」. 台灣大學全球變遷研究中心，台北市.

柳中明 劉銘龍. 1997. 全球變遷對我國之衝擊評析與因應建言. 全球變遷通訊 14：9~22.

柳中明. 1997. 氣候將暖化嗎？現階段的反面爭議. 全球變遷通訊 15：18~21.

柳中明 劉銘龍 張品青. 1997. 能源與二氧化碳排放減量. 全球變遷通訊 16：1~9.

施學明. 1997. 海岸環境變遷展望. 1997年4月23日「邁向二十一世紀：全球變遷之衝擊與因應」研討會. 台灣大學思亮館國際會議廳，台北市.

陳福來 張修武. 1997. 台灣地區臭氧及紫外線觀測之資料分析. p.111~117. 1997年3月3-5日「天氣分析與預報研討會氣象論文彙編」. 中央氣象局，台北市.

許晃雄. 1997. 氣候變遷展望. 1997年4月23日「邁向二十一世紀：全球變遷之衝擊與因應」研討會. 台灣大學思亮館國際會議廳，台北市.

梁仁有 耿旭 劉復誠 林深林. 1997. 氣候改變對台灣地區蒸發散量影響的模擬研究. 氣象學報 41(4)：246~271.

郭振泰. 1997. 水資源變遷展望. 1997年4月23日「邁向二十一世紀：全球變遷之衝擊與因應」研討會. 台灣大學思亮館國際會議廳，台北市.

楊日昌. 1993. 全球變遷與台灣. p.3~4.「全球變遷與能源問題研討會論文摘要」. 工業技術研究院能源與資源研究所，新

竹縣.
楊任徵 黃肇英 朱育華 周恬弘 方良吉. 1994. 與能源有關的溫室氣體統計-IPCC方法的應用. p.40. 經濟部能源委員會.
楊盛行. 1995. 氣候變遷與農業生產. p.65~83. 氣候變遷與農業生產. 行政院農業委員會出版，台北市.
廖志翔. 1995. 台灣地區春季降雨分析及與ENSO關係之探討. 中央氣象局研究發展專題CW84-1A-04號.
劉育宏 曾仁佑. 1998. 東亞地區區域氣候變遷之研究. p.369~376. 1998年2月23-25日「天氣分析與預報研討會論文彙編」. 中央氣象局，台北市.
謝志誠. 1997. 經濟大風暴前的寧靜-氣候變化綱要公約的衝擊與省思. 全球變遷通訊 16：21~29.
環保署. 1994. 台灣地區氣候變遷因素之初步評估及基本科技資料建立先期計畫. 行政院環境保護署委託研究報告EPA-83-E3-02-03-20.
Bojkov, R. D., C. S. Zerefos, D.S. Balis, I. C. Ziomas and A. F. Bais. 1993. Record low total ozone during northern winter of 1992 and 1993. Geophys. Res. Lett. 20: 1351~1354.
Bojkov, R. D. 1995. The Changing Ozone Layer. WMO Report.
Bolin, B., J. Jager and B. R. Doos. 1986. The greenhouse effect, climatic change, and ecosystems: A synthesis of present knowledge. John wiley & sons, Chichester. pp. 1~34.
Bremner, J.M., G.A. Breitenbeck and A.M. Blackmer. 1981. Effect of anhydrous ammonia fertilization on emission of nitrous oxide from the soil. Journal of Environmental Quality 10:77-80.
Bruce, J.P. 1994. Natural Disaster Reduction and Global Change. Bull. American Metero. Soc. 75: 1831~1835.
Chang, J.-C.J. 1996. An exploratory study of the relationship between annual frequency of invaded typhoons in Taiwan and El Nino/Southern Oscillation. TAO. 7: 83~105.
Dickinson, R. E. and R. J. Cicerone. 1986. Future global warming from atmospheric trace gases. Nature. 319: 109~115.
Emanuel, K. A. 1987. The dependence of hurricane intensity on climate. Nature. 326: 483~485.
Eriksen A., M. Kjeldby and S. Nilsen. 1985. The effect of intermittent flooding on the growth and yield of wetland rice and nitrogen-loss mechanism with surface applied and deep placed urea. Plant and Soil 84 : 387-401.
Frohberg, K., and P. R. Vande Kamp. 1988. Results of Eight Policy Scenarios for Reducing Agricultural Sources of Trace Gas Emissions. Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University. Report presented for U. S. EPA.
Fung, I. , E. Matthews and J. Learner. 1988. Trace Gas Emissions Associated with Agricultural Activities. Prepared for the EPA Workshop on Agriculture and Climate Change, Washington, D. C., February 1988.
Groffman, P., P. Hendrix and D. Crossley. 1987. Nitrogen dynamics in conventional and no-tillage agroecosystems with inorganic fertilizer or legume nitrogen inputs. Plant and Soil 97 : 315-332.
Hadley Center. 1995. Modeling Climate Change 1860~2050. The Meteorological Office. U.K.
Hansen, J.E., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Rudy and J. Lerner. 1984. Climate sensitivity: analysis of feedback mechanisms. *In:* climate

Processes and Climate Sensitivity. J. E. Hansen and T. Takahashi (Eds). Geophys. Monoger. 29: 368.

Houghton, R., R. Boone, J. Fruci, J. Hobbie, J. Melillo, C. Palm, . Peterson, G. Shaver, G. Woodwell, B. Moore, D. Skole and N. Myers. 1987. The flux of carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land use : Geographic distribution of the global flux. Tellus 39B: 122-139.

IPCC. 1990. Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press. 365pp.

IPCC. 1992. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Houghton, J. T., B. A. Callander and S. K. Varney..(Eds.). Cambridge University Press. Cambridge. U. K. 200pp.

IPCC. 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Houghton, J. T., L. G. Meria Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (Eds.) Cambridge University Press. 572 pp.

Johnson, D. E. 1988. Livestock Emissions Estimates. Presented at U. S. EPA workshop on Agriculture and Climate Change, Washington, D. C., February 29 -March 1, 1988.

Kerr, R. A. 1994. Antarctic ozone hole fail to recover. Science. 266: 217.

Lashof, D. a., and D. a. Tirpak. 1990 Policy options for stabilizing global climate. Hemisphere Publishing Corporation. 810 pp.

Merrill, R. T. 1988. Environmental influences on hurricane intensification. J. Atmos. Sci. 45: 1678~1687.

Moe, P. and H. Tyrell. 1979. Methane production in dairy cows. Journal of Dairy Science 62:1583-1586.

Noda, A., and T. Tokioka. 1989. The effect of doubling the CO_2 concentration on convective and non-convective precipitation in a general circulation model coupled with a simple mixed layer ocean. J. Met. Soc. Japan. 67: 1055~1067.

Ramanathan, V. 1988. The radiative and climate consequences of the changing atmospheric composition of trace grases. pp.159~186. The Changing Atmosphere. Rowland. F. S., and I.S.A. Isaksen(Eds.).

Rind, D., R. Goldberg and R. Ruedy. 1989. Change in climate variability in the 21st century. Climatic Change. 14: 5~37.

Stangel, P. 1988. Technological Options Affecting Emissions. Presented at U. S. EPA Workshop on Agriculture and Climate Change, Washington, D. C., February 29-March 1, 1988.

Strzepek, K. M., and J. B. Smith(Eds.). 1995. As Climate Change: International Impacts and Implications. Cambridge University Press.

Subak, S., P. Raskin and D. V. Hipple. 1993. National greenhouse gas accounts. Current anthropogenic sources and sinks. Climatic Change. 29: 35~58.

Takedo, T. 1993. Remote Sensing and heavy rainfall diasters. pp.397~407. Aichi/ Nagoya International conference. Japan. International Decade for Nature Disaster Reduction.

Trenberth, K. E., J. R. Christy and J. G. Olson. 1987. Global atmospheric mass, suface pressure and water vapor variations. J. Geophys. Res. 92(14): 815~14826.

Wigley, T. M. L. 1995. Global mean temperature and sea-level consequence of green-

house gas concentration stabilization. Geophys. Res. Lett. (in press).

Wilson, C. A., and J. F. B. Mitchell. 1987. Simulated CO2 induced climate change over western Europe. Climatic change. 10: 11~42.

Winrock. 1977. Ruminant Products: More than Meat and Milk. Windrock International Livestock Research and Training Center. Morrilton, Arkansas.

World Bank. 1988. World Bank, FAO, UNIDO Fertilizer Working Group Nitrogen Supply, Demand and Balances for 1986/87 to 1992/93. Washington, D. C.

World Meteorological Organization (WMO). 1992. Scientific Assessment of Ozone Depletion. No. 25. WMO Report.

World Meteorological Organization (WMO). 1994. Scientific Assessment of Ozone Depletion. Global Ozone Research and Monitoring Project. No. 37. WMO Report.

Chapter 2 Effects of Global Climate Change on Meteorological Circumstances in Globe and Taiwan Area and Strategies in Response

Chin-Shiang Liao
Agrometeorology Branch, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

An increase in the atmospheric concentrations of greenhouse gases resulting from human activities enhances the greenhouse effect, which results in climatic change and warms the earth's surface. Under the tendency of the climate change, the impact on the meteorological environments in global scale and Taiwan area is an imminent problem that Taiwan and the nations of the world must face. It is the main purpose of this paper to review the related issues and selected previous studies, meanwhile, to make a recommendation and strategy in response to this problem. The variations of long-term atmospheric greenhouse gases and the estimated emissions in the future are described first. Then, the climatic changes around the globe and Taiwan area in the past are investigated. Over the past 100 years, the global mean temperature has risen about 0.6℃, the sea level has risen around 10-20cm. In the response to doubling CO_2 for the coming future, the global mean temperature, the mean sea level will continue to rise. The frequency of the disastrous weather caused by the climatic variability will increase and be more severe. Such obvious changes of climatic environment not only affect crop production, but also impact the management of water resources and food supply. Finally, the response strategies, for reducing greenhouse gas emissions; especially from the energy use, forestry and agricultural control options, for the climate researches and predictions, for sustainable development of the water resources and the coastal change, are provided.

Key words: Greenhouse effect gases, Climate change, Climate variability, Sustainable development.